

## Finite Element Analysis of Broken Excavator Boom Welding Cases and Ascertaining its Ability to Restore its Functions

Alaa Rihawi\*

(Received 27 / 6 / 2022. Accepted 7 / 11 / 2022)

### □ ABSTRACT □

The most important problems facing excavators during investment are the sudden breaks of their arms, which cause great material damage that leads to work stoppage, and the excavator breaks down as a whole. This research presents a detailed study of the performance of the arms used in the excavators after breaking and welding operations, taking into account the design of the arms in the excavators while they are exposed to compound static loads and dynamic loads similar to those that they can be exposed to in practice, as well as studying the effect of engineering parameters on the behavior of connections of a permissible type - Column with plate, the parameters studied are (plate thickness, additional joints and their number) separately. The research includes a detailed study of the behavior of welded joints at the place of breaking the arm and their parameters mentioned above using the finite element method, and knowledge of the different types of stresses and emerging transitions formed in each element of the arm in a way that allows a good understanding of the behavior of each element separately for each of the studied parameters, and thus arrive at The final result of the safety factor of the broken arm after welding and comparison of the results with the arm before cracking and breaking.

**Keywords:** Excavator arm with bucket, stress analysis of welded joints, finite elements.

---

\* MSc – Department of Design and Production Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University- Latakia - Syria.

## التحليل بالعناصر المنتهية لحالات لحام ذراع الحفارة ذات الجرافة المنكسر والتأكد من قدرة استعادته لوظائفه

علاء ربحاوي\*

(تاريخ الإيداع 27 / 6 / 2022. قُبِلَ للنشر في 7 / 11 / 2022)

### □ ملخص □

تتلخص أهم المشكلات التي تواجه الحفارات أثناء الاستثمار، في الانكسارات المفاجئة لأذرعها، والتي تتسبب بأضرار مادية كبيرة تؤدي إلى توقف العمل، وتعطل الحفارة ككل. يقدم هذا البحث دراسة مفصلة لأداء الأذرع المستخدمة في الحفارات بعد الانكسار وإجراء عمليات اللحام مراعيًا تصميم الأذرع في الحفارات أثناء تعرضها لحمولات ستاتيكية مركبة ولحمولات ديناميكية مشابهة لتلك التي يمكن أن تتعرض لها في الواقع العملي، وكذلك دراسة تأثير البارامترات الهندسية على سلوك الوصلات من نوع جأز - عمود مع صفيحة، أما البارامترات التي تمت دراستها فهي (سماكة الصفيحة، الوصلات الإضافية وعددها) كل على حدة. ويتضمن البحث دراسة مفصلة لسلوك الوصلات الملحومة بمكان كسر الذراع وبارامترات المذكورة أعلاه باستخدام طريقة العناصر المنتهية، ومعرفة أنواع الإجهادات المختلفة والانتقالات الناشئة المتكونة في كل عنصر من عناصر الذراع بشكل يسمح بفهم جيد لسلوك كل عنصر على حدة لكل بارامتر من البارامترات المدروسة، وبالتالي الوصول إلى النتيجة النهائية لمعامل أمان الذراع المنكسر بعد اللحام ومقارنة النتائج مع الذراع قبل التصدع والانكسار.

**الكلمات المفتاحية:** ذراع الحفارة ذات الجرافة، تحليل الإجهادات للوصلات للحامية، العناصر المنتهية.

\* (ماجستير) - صميم وانتاج - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. [alaarihawi@tishreen.edu.sy](mailto:alaarihawi@tishreen.edu.sy)

**مقدمة:**

الحفارة عبارة عن آلات ضخمة تعتبر من المعدات الثقيلة والمعدات الثقيلة المخصصة للأعمال الضخمة من هدم وحفر وجر ورفع أضخم تلك الحفارات تعمل في استخراج الفحم من مناجم سطحية، وتصل كتلة الرافعة نحو 2000 طن. تتكون الحفارة من عدة أجزاء وهي:

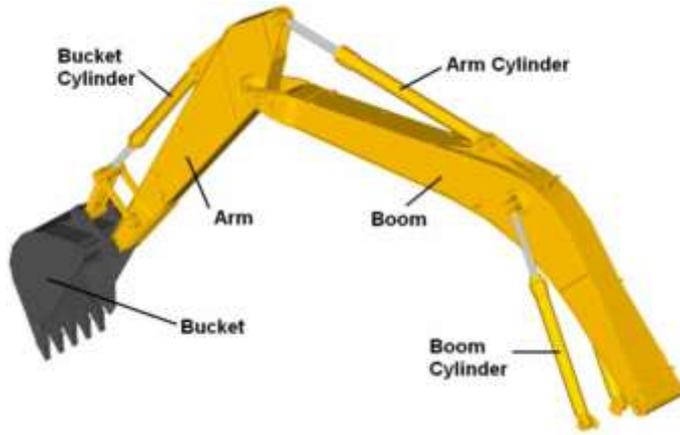
ا. ذراع التطويل

ii. الذراع

iii. ملحق الحفارة (ويختلف حسب وظيفتها)

iv. سيارة شاحنة

v. منصة للقيادة.



الشكل (1) مرفق الحفارة الهيدروليكية

وكل حركة ووظيفة تقوم بها الحفارة تعتمد على استخدام السوائل الهيدروليكية التي تعمل بالضغط، سواء كان ذلك مع الكباش أو المحركات الخاصة بها. [1]

وظائف الحفارة:

1. حفر الخنادق، والتقوب والأسس

2. مناولة المواد

3. عمليات القطع للأدوات الضخمة

4. تستخدم أيضا في نقل الاخشاب من الغابات

5. هدم الابنية

6. رفع الأشياء الكبيرة والثقيلة، مثل رفع والأنابيب الضخمة

7. في اعمال الحفر والتجريف

وفقاً لجهاز عمل الحفارة ومتطلبات النقل لكل آلية، فإن مجموعة المكونات الهيدروليكية والأنابيب المختلفة متصلة ببعضها البعض، والتي تسمى النظام الهيدروليكي للحفارة. وتتمثل مهمتها في استخدام السائل الهيدروليكي كوسيط للعمل، واستخدام المضخة الهيدروليكية لتحويل الطاقة الميكانيكية للمحرك إلى طاقة هيدروليكية ونقلها، ثم نقل الطاقة الهيدروليكية مرة أخرى إلى الطاقة الميكانيكية من خلال الاسطوانات الهيدروليكية والمحركات الهيدروليكية لتحقيق مختلف أعمال الحفارة.

وفقاً لخصائص المضخة الهيدروليكية، يحتوي النظام الهيدروليكي المستخدم في الحفارات الهيدروليكية عموماً على ثلاثة أنواع: النظام الكمي، النظام المتغير والنظام الكمي والمتغير. [2]

### عرض مشكلة البحث:

يعد ذراع الحفارة من أهم المكونات الأساسية المشاركة في عملية الحفر والذي يتعرض لقوى وعزوم كبيرة قد تؤثر في بعض الحالات لتصدع الحفارة وتعطلها عن العمل.  
إن الذراع (Arm) هو الجزء الواصل بين الجرافة (الدلو) (Bucket) وذراع التطويل (Boom) الذي يصله مع جسم الحفارة عن طريق قطع الربط، ويعتمد حركته من النظام الهيدروليكي.



الشكل (2) كسر على طول ذراع الحفارة



الشكل (3) حالة واقعية لانكسار الذراع

- ❖ في بعض الحالات قد تتم عملية اللحام لوصل الذراع وذلك يؤثر بشكل سلبي حيث سيتحطم الذراع بشكل دوري وقد تنتقل المشكلة إلى جزء آخر وبالتالي فشل الآلة بالكامل .
- ❖ إن عملية اللحام تعد حلاً مؤقتاً وسندرس إمكانية تحمل الذراع للقوى الستاتيكية بعد لحامه



الشكل 4) تم إصلاح الذراع بعملية اللحام

تتلخص مشكلة البحث بشكل رئيس في دراسة وتحليل سلوك التصدع الناجم عن العزوم المؤثرة في الذراع (عزوم الانحناء والقتل) خلال فترة التحميل وبالتالي حدوث الانكسار على طول الذراع. والجدير بالذكر أن طول الذراع يؤثر بشكل جوهري على زيادة الإنتاجية عن طريق زيادة طول وعمق الحفر وبالتالي الحصول على نطاق عمل أكبر. إن زيادة طول الذراع تحتاج إلى دراسة الحمولات والعزوم الإضافية الناتجة عن هذا التعديل الذي يزيد من مشكلة الكسر في ذراع الحفارة.

#### أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من تقليل خطورة انكسار الذراع أثناء فترة العمل مع ما يرافقه من مشاكل قد تبدأ بانهيار الآلة وتنتهي بتعرض العنصر البشري للخطر وتكمن في التحقق من الحلول العشوائية التي يتم اتخاذها لحل مشكلة تصدع ذراع الحفارة ذات الجرافة وانكساره وذلك لاستكمال أعمالها، فالحل دون دراسة لن يلبى الغرض التصميمي للجائر من ناحية الحمولات الديناميكية، واستناداً على ما سبق سيتم التأكد من هذه الحلول بطريقه العناصر المنتهية. وإن الهدف من هذا البحث هو التحقق من استطاعة الذراع القيام بوظائفه عند نفس قيم التحميل السابقة لانكساره وذلك من خلال تطبيق تقنيات التحليل باستخدام العناصر المنتهية *FEA*

## طرائق البحث ومواده:

وتتلخص بدراسة وبحث النقاط التالية:

- دراسة سلوك الانحناء لجائز مقطعه مستطيل أجوف.
- اجراء عملية المحاكاة الأولية باستخدام برنامج Autodesk Inventor من أجل سيناريوهات الانحناء وتحديد أماكن التصدع والفتل.
- التحليل الستاتيكي بمساعدة طريقة العناصر المنتهية *FEM* وحساب كافة الاجهادات والانتقالات على الجائز لتحديد أماكن وقيم فشل وانهيار الجائز.
- إجراء عملية التحقق.

المتطلبات الرئيسية لمسألة التصميم قيد الدراسة:

- الحمولة القصوى المنقولة إلى الذراع.
- عامل الأمان المطلوب.
- المواد المستخدمة في بناء ذراع الحفارة.
- سماكة الصفائح المكونة للذراع

تطبيق حساب قوة الحفار *Excavator Force Calculation*:

جدول 1( قوة التماسك حسب نوع التربة [6])	
نوع التربة	قوة التماسك [kPa]
ناعمة جداً	0 to 48
طينية ناعمة	48 to 96
متوسطة	96 to 192
قاسية	192 to 384

من تجربة ريس نجد قوة التماسك 23930 باسكال وهي قيمة منطقية كون التربة المدروسة قاسية

$$F_r = V_s \gamma g d$$

$$V_s = 6.5 \text{ m}^3$$

$$d = 0.236 \text{ m}$$

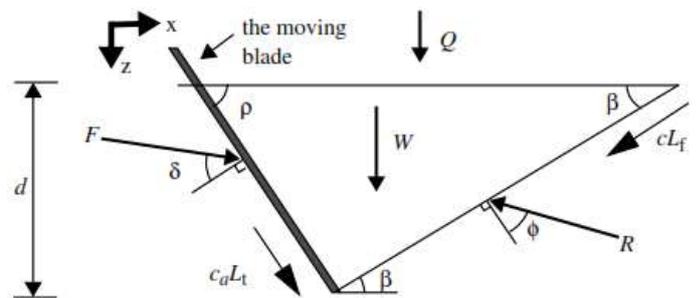
$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

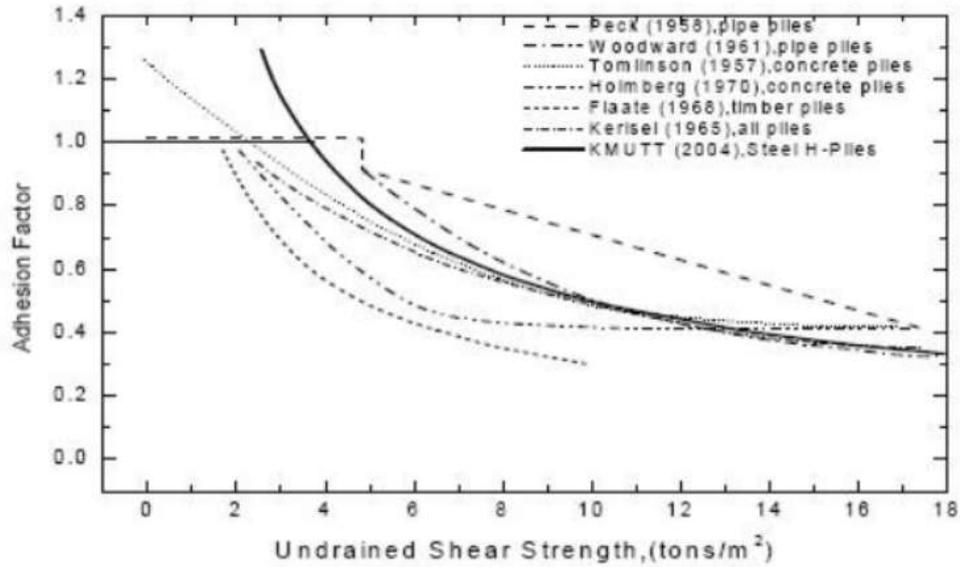
$$\gamma = 1520 \text{ Kg/m}^3 = 14912 \text{ N/m}^3$$

$$F_r = (6.5) (14912) (0.236)$$

$$F_r = 22875 \text{ N.m}$$

وهي قوة إعادة تشكيل التربة





الشكل 5) معاملات التصاق التربة

$$C_a = 12020 \text{ N/m}^2$$

$$c = 23930 \text{ Pa}$$

$$W = \gamma g \frac{d^2}{2} (\cot \alpha + \cot \beta) \quad ; \alpha = \rho = 35 \text{ deg}$$

$$W = 14912 \times \frac{(0.236)^2}{2} \times (1.428 + 1.327) = 1144 \text{ N/m}$$

$$Q = qd (\cot \alpha + \cot \beta) \quad ; q = 10 \text{ N/m}^2$$

$$Q = 10 \times 0.236 \times (1.428 + 1.327) = 6.5 \text{ N/m}$$

$$F = \frac{W + Q + cd[1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi)] + c_a d[1 - \cot \rho \cot(\beta + \phi)]}{\cos(\rho + \phi) + \sin(\rho + \phi) \cot(\beta + \phi)}$$

$$\cos(\rho + \phi) = 0.423 \quad \sin(\rho + \phi) = 0.906$$

$$F = \frac{1144 + 6.5 + [23930 \times 0.236 \times (1 + (1.327 \times 0.424))] + [(12020 \times 0.236 \times (1 - (1.428 \times 0.424))]}{0.423 + (0.906 \times 0.424)} = 13746 \text{ N/m}$$

هذه الصيغة للمعادلة تعطي قيمة قوة مقاومة التربة بالنيوتن على متر، لذلك تستخدم معاملات  $N$  لإعادة صياغة معادلة تحريك التربة الأساسية مع الأخذ بالحسبان أن التربة المدروسة هي غير أفقية بشكل تام وإنما هناك زاوية لتضاريس التربة  $\alpha$  تؤخذ من قيم تجريبية ولكنها تساوي زاوية الجرف ضمن عملية الحفر. [6] ، [7]

$$\alpha = \rho = 35 \text{ deg}$$

تصبح الصيغة الجديدة لمعادلة FEE على الشكل الآتي:

$$F = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q) w$$

إذ إن  $w$  هي عرض الأداة وهي ضمن الحفار المدروس  
 $w = 2.78 \text{ m}$

$$N_\gamma = \frac{\cot \alpha + \cot \beta}{2 [\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi)]}$$

$$\beta = \beta_{cr} = 37 \text{ deg}$$

$$\delta = 23.5 \text{ deg}$$

$$\phi = 30 \text{ deg}$$

$$\rho = 35 \text{ deg}$$

$$N_c = \frac{[1 + \cot \beta_{cr} \cot(\beta_{cr} + \phi)]}{[\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta_{cr} + \phi)]}$$

$$N_q = \frac{\cot \alpha + \cot \beta_{cr}}{[\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta_{cr} + \phi)]}$$

$$\cot \rho = 1.428 \quad \cot \beta = 1.327$$

$$\cot(\beta + \phi) = 0.424 \quad \cos(\rho + \delta) =$$

$$0.523 \quad \sin(\rho + \delta) = 0.853$$

$$N_a = \frac{[1 - \cot \alpha \cot(\beta_{cr} + \phi)]}{[\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta_{cr} + \phi)]}$$

$$N_\gamma = \frac{1.428 + 1.327}{2(0.523 + (0.853 \times 0.424))}$$

$$= 1.56$$

$$N_c = \frac{1 + (1.327 \times 0.424)}{0.523 + (0.853 \times 0.424)} = 1.77$$

$$N_q = \frac{1.428 + 1.327}{0.523 + (0.853 \times 0.424)} = 3.11$$

$$N_a = \frac{1 - (1.428 \times 0.424)}{0.523 + (0.853 \times 0.424)} = 0.46$$

$$P = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q + c_a d N_a) w$$

$$P = [(14912 \times (0.236)^2 \times 1.56) + (23930 \times 0.236 \times 1.77) + (10 \times 0.236 \times 3.11) + (12020 \times 0.236 \times 0.46)] \times 2.780$$

$$P = (12604 \times 2.78)$$

$$P = 35039 \text{ N}$$

وهي قوة مقاومة التربة أثناء الحفر

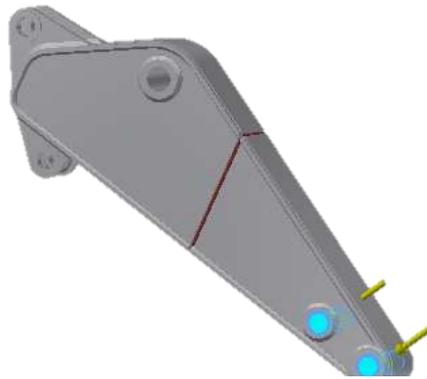
### دراسة حالة اللحام التي جرت على الذراع المنكسر

يمكن التأكد من معامل الأمان في الخيار الذي شوهد سابقاً لعملية اللحام التي أجريت على الذراع المنكسر، وذلك عن طريق محاكاة العملية في بيئة *AIP* ومناقشة النتائج التي ستظهر.

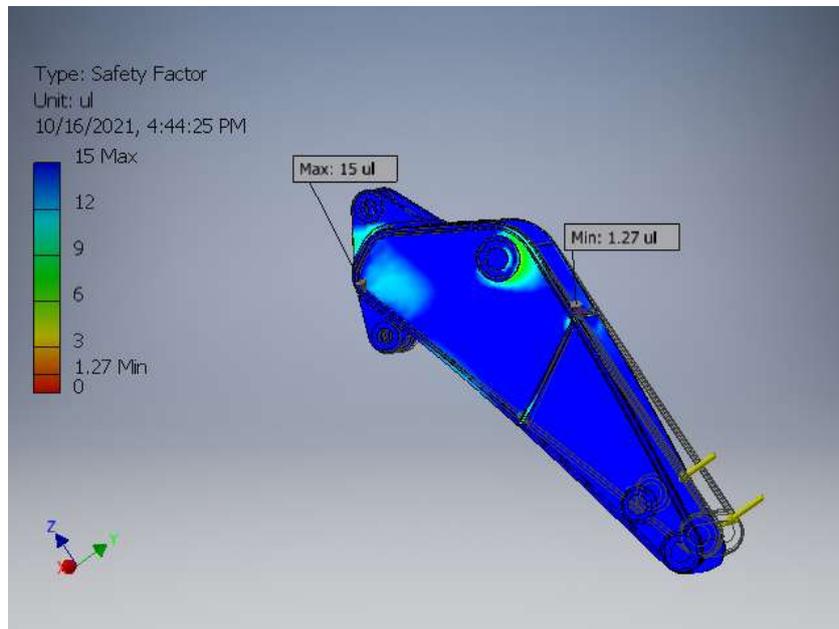
وستتم عملية اللحام على التصميم السابق الذي تم اعتماده وفق سماكة صفائح  $21\text{ mm}$ .

### الحالة الأولى

يتم تطبيق شروط التحميل والتثبيت ذاتها على ذراع بوصلة لحامية دون دعامة.



الشكل (6) تحليل الإجهادات للذراع المنكسر الملحّم



الشكل (7) نتائج تحليل الذراع المنكسر الملحّم

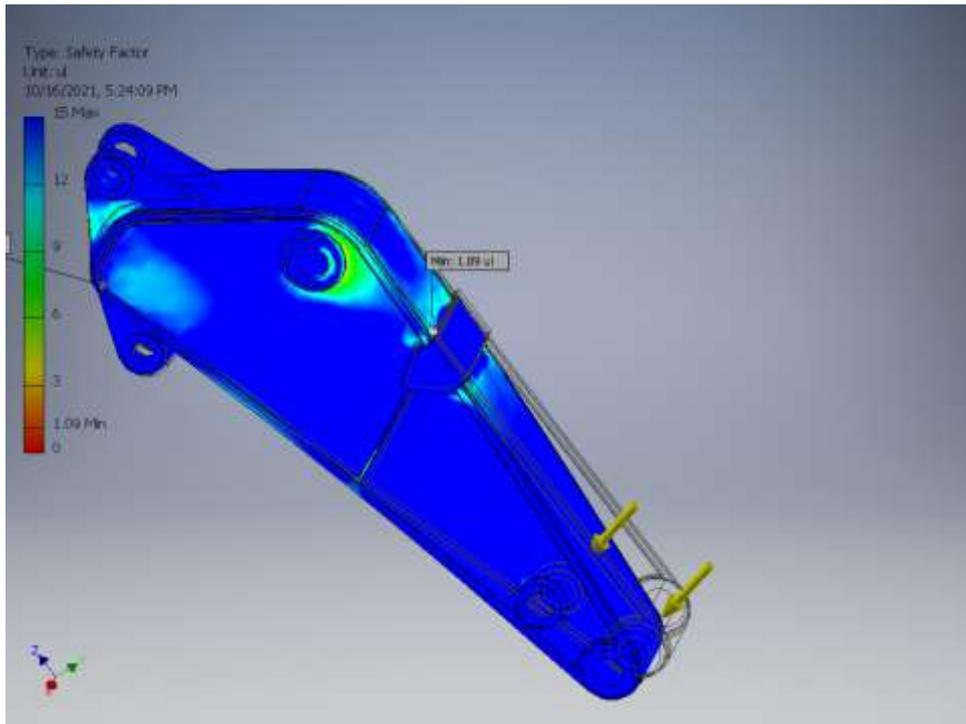
في هذه الحالة معامل الأمان  $1.27$  وهو أقل من القيمة التصميمية المفروضة  $2$  لذلك عملية اللحام على الذراع لا تلبّي المتطلبات التصميمية في ظروف التحميل المفروضة.

### الحالة الثانية

يتم تطبيق شروط التحميل والثنيت ذاتها على ذراع بوصلة لاحامية مع دعامة واحدة كما ورد في الحالة الموجودة، ومع دعامتين ليتم عرض الفروقات في النتائج.

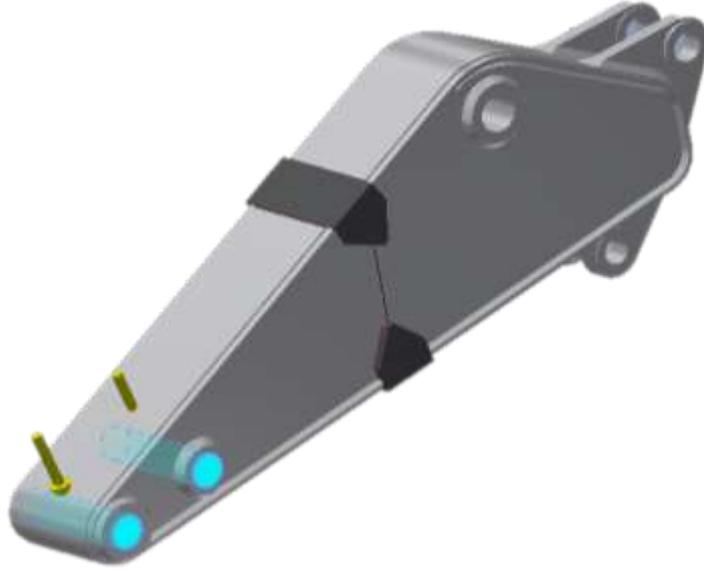


الشكل 8) تحليل الإجهادات للذراع المنكسر الملحّم بوصلة دعامية واحدة

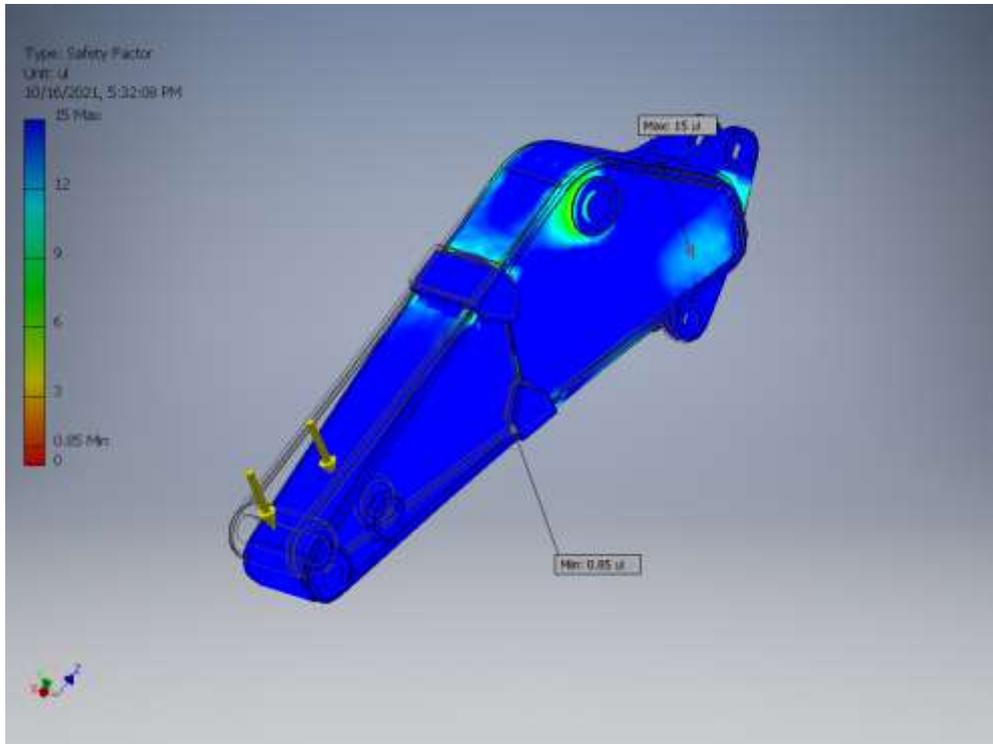


الشكل 9) نتائج تحليل الذراع المنكسر الملحّم بوصلة دعامية واحدة

في هذه الحالة معامل الأمان 1.09 وهو خاص بالوصلة الدعامية التي تم لحامها على الذراع وهذا يعني أن عملية التحطم للوصلة ستتم أولاً ثم للذراع لاحقاً لذلك عملية اللحام مع وصلة دعامية واحدة لا تلبى المتطلبات التصميمية في ظروف التحميل المفروضة.



الشكل (10) تحليل الإجهادات للذراع المنكسر الملحّم بوصلتين دعاميتين



الشكل (11) نتائج التحليل للذراع المنكسر الملحّم بوصلتين دعاميتين

يلاحظ انتقال نقطة الضعف إلى الوصلة الدعامية السفلية وبقيمة معامل أمان 0.85 وذلك يعني تتالي الانكسارات التي ستحدث ابتداءً بالوصلة الدعامية السفلية، وانتهاءً بالذراع وبالتالي فشل الحفارة بالكامل.

## الاستنتاجات والتوصيات:

### الاستنتاجات:

1. إن استخدام الهندسة العكسية لنقل التصميم الحقيقي للحفارة إلى برنامج *Autodesk Inventor / CAD Professional* يعطي إمكانية كبيرة لتطوير منهجية التصميم والحساب الأمثل لذراع الحفارة الحقيقي ومعرفة أسباب انكساره وتلافيتها.
2. تتيح المحاكاة وطريقة العناصر المنتهية دراسة كل الأحوال، ووضع تصور للإجهاد والانفعال والانزياح في كل نقطة من ذراع الحفارة. مما يعني عن إجراء نماذج أولية مكلفه للحفارة والقيام بعملية دراستها والتي تتطلب جهداً ووقتاً كبيرين بالإضافة للكلفة الكبيرة المترتبة على اختبار حالات مختلفة لذراع الحفارة قيد البحث.
3. تم دراسة فشل الذراع وتحطمه في مكان حدوث الفشل وإعادة لحامه ودراسته بطريقة العناصر المنتهية عند نفس الحمولة ونفس ظروف التشغيل في الحالات الآتية:

I. بدون وصلة دعامية.

II. مع وصلة دعامية.

III. مع وصلتين دعاميتين.

وتبين أن اللحام لا يلبي الغرض التصميمي كحل دائم عند الحمولات الديناميكية.

### التوصيات:

1. دراسة مقاطع أخرى واستخدام معادن مختلفة عن المعدن المستخدم.
2. إجراء التحليل الديناميكي لذراع الحفارة.
3. التحقق من نتائج التصميم الحاسوبي وذلك بإجراء تجارب فعلية على نموذج مصنع وفق معايير التصميم المقترحة.
4. دراسة تغير طول ذراع الحفارة وأثره على زيادة الإنتاجية ومساحة العمل.

## References

- [1]Nureddin Bennett, Ashwin Walawalkar, Meike Heck and Christian Schindler. (2015). Integration of digging forces in a multi- body-system model of an excavator. *Journal of Multi-body Dynamics*.0(0). 1-19
- [2]Andrea Bedotti, Mirko Pastori, Paolo Casoli. Modelling and energy comparison of system layouts for a hydraulic excavator. *sciencedirect*.2018 Sep 14 ;148(2018)26-33
- [3]Mehulkumar. A. Patel (Enrollment NO. - 13014041003). (2015) Trajectory Planning for Backhoe Excavator. Ganpat University. India
- [4]Modeling and Identification of Soil-tool Interaction in Automated Excavation O. Luengo DISAM, Universidad Politecnica de Madrid (Spain) In Proceedings, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotic Systems, October 13-17, 1998 Victoria, B.C., Canada.
- [5]AN EXCAVATION FORCECALCULATIONS AND PPLICATIONS: AN ANALYTICAL APPROACH BHAVESHKUMAR P. PATEL Assistant Professor,

- Mechanical Engineering, U. V. Patel College of Engineering, Ganpat University (GNU), Kherva, Dist: Mehsana, Gujarat, 382711, India Vol. 3 No. 5 May 2011 ISSN: 0975-5462
- [6]A STUDY ON THE CLAY ADHESION FACTOR Xiuhan Chen, Jan van den Broecke, Gongxun Liu, Guojun Hong & Sape A. Miedema Delft University of Technology, DEMA, CCCC-NERCD -WEDA Dredging Summit & Expo, June 4-7, 2019, Chicago
- [7]Analysis of Rake Angle Effect to Stress Distribution on Excavator Bucket Teeth Using Finite Element Method S. Hadi Suryo a\*, A. P. Bayuseno a, J. Jamari a, A. Imam Wahyudi a Department of Mechanical Engineering, University of Diponegoro, Semarang, Indonesia. Civil Engineering Journal Vol. 3, No. 12, December, 2017
- [8]Hieftje, Gary; et al. (2006). Effect of the plasma operating frequency on the figures of merit of an inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometer. Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 21 (2): 160–16
- [9]Meyer, C. J. (2006) “Finite Element Analysis for the Masses; an Introduction”, FEAdomian.com, 2006.